

커패시터 분할형을 갖는 직렬공진 고주파 인버터의 특성해석

이 봉섭*, 오 승훈*, 정 도영, 이 상호, 고 서영, 오 흥석**
 삼척대학교, 동해대학교*, (주)이맥스 하이테크**

Characteristic Analysis of Series Resonant High Frequency Inverter with Separated Capacitor

Bong-Seob Lee, Seung-Hoon Oh*, Do-Young Jung, Sang-Ho Lee, Seo-Yeong Ko, Hong-Seok Oh**
 Samchok National University, Tong-Hae University*, Emacs H.T co.,Ltd**

Abstract - In this paper, load paralleled type FB series resonant inverter of a new novel type is proposed. In the output control method, phase-shift driving signal control method with CVCF introduces. Also, by driving signal patterns, the operation principle of the proposed circuit in detail is described and its characteristics are compared on separated ratio(n). According to each the mode, in order to the analysis and characteristic evaluation of the circuit state equations are derived and presented using normalized parameter. To verify the theoretical analysis result, experimental results are provided.

의 구성을 나타낸다. 부하 병렬형 회로에 커패시터 C_1 을 직렬로 연결하여 직렬공진·커패시터 분할된 회로 구성으로 되어 있다. 여기서, 분할비 $n=C/C_1$ 로 한다. 회로에서 커패시터 C_1 이 단락상태가 되면 $n=0$ 이며 C_1 이 C에 비해 매우 클 경우에는 필터용 콘덴서로 작용한다.

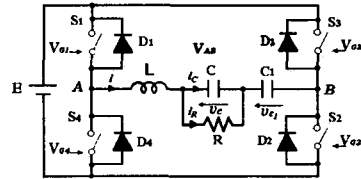


그림 1 직렬공진 FB 커패시터 분할형 고주파 인버터

1. 서 론

전력전자 기술발전의 배경에는 전력용 반도체 스위칭 소자의 개발과 이를 이용한 새로운 전력변환 회로의 개발을 향한 끊임없는 연구의 결실이다. 최근 산업용 기기나 정보시스템 및 통신 기기들은 날로 고밀도, 고속화, 집적화되는 추세로 이들 기기의 전원부 역시 속용성과 신뢰성이 높고 전력밀도가 큰 것이 요구되며, 특히 양질의 정전압 인버터와 가변주파수, 가변 전압등의 기능을 가진 인버터에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

최근의 스위칭 소자는 전압 구동제어 소자로 구동 전력의 소모가 적고 스위칭 속도가 빠른 중·대용량 고속 스위칭 소자(GTO, Power-MOSFET, SIT, IGBT, SI-Thy)가 개발되어 수백 ㎍대 또는 그 이상의 고속 스위칭도 가능하게 되었다. 전력변환 시스템에서는 신형 전력용 소자를 도입하여 새로운 회로 방식의 개발은 물론 새로운 제어 기능을 부여하여 운전동작 영역의 확장과 출력을 제어하고 있다.[1]

전력변환 회로기술 중에 고주파 출력을 발생시키는 응용분야로는 유도 가열용 전원, 강력 초음파 발전용 전원과 고주파 링크형 컨버터, 무정전 전원장치(UPS)등으로 그 수요가 날이 증가되고 있으며, 신형 전력용 스위칭 소자를 이용한 고주파 인버터의 개발과 평가는 전원장치 기술 분야에 있어서 매우 중요한 것으로 인식되고 있다. [2][3]

본 논문에서는 이러한 기술적인 배경으로 커패시터 분할형을 갖는 새로운 형태의 직렬공진 고주파 인버터를 제안하고 있다. 인버터의 출력제어 방법으로 구동 신호 위상쉬프트 방법을 소개하고 회로의 동작원리 및 콘덴서 분할비에 따른 특성도 나타내고 있다. 실제 시스템을 제작하여 실험을 통하여 각 부의 파형을 시뮬레이션 결과와 비교하여 타당성을 확인하고 있다.

2. 직렬공진 FB 커패시터 분할형 고주파 인버터

2.1 회로의 구성과 위상쉬프트 제어 동작원리

그림 1은 직렬공진 FB 커패시터 고주파 인버터 회로

그림 2는 고주파 출력 제어를 위한 스위치에 인가되는 구동신호 형태와 출력 파형을 나타낸다. 그림 2의 (a)는 인버터 회로의 스위치 (S1,S2)와 (S3,S4)를 상호 대각으로 스위치를 턴-온·오프 하여 부하에 고주파 전력을 공급하며, 고주파 출력전력 제어는 스위치에 인가되는 펄스 주파수변조(PFM)방식에 의한다. 그림 (b)는 스위치(S1,S4)에 인가되는 구동신호를 기준으로 하여 동기상태를 유지하면서 (S2,S3)에 인가되는 구동 신호의 위상(ϕ)을 $0^\circ \sim 180^\circ$ 까지 위상쉬프트(Phase shift)하여 고주파 출력을 제어하고 있다.

ϕ 가 0° 일 때는 그림 2의(a)로 동작하고 ϕ 가 180° 일 때는 좌우 스위치의 아암이 단락 상태로 되어 출력전력은 거의 나오지 않는다.

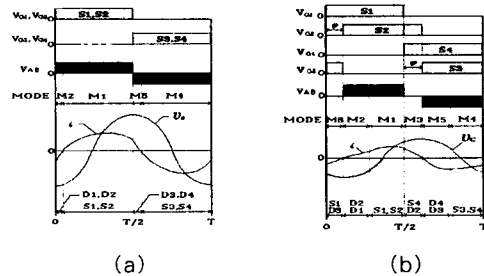


그림 2 구동신호 패턴에 대한 출력 파형

2.2 회로 해석과 동작특성

커패시터 분할형 인버터의 구동신호에 따른 동작 모드를 분류하면 표 1과 같다.

표 1의 동작 모드에 따라 상태방정식을 나타내면 다음과 같다. 그리고 회로해석에서 특성 평가의 일반성을 주기 위해 정규화 파라미터를 적용하였다.

$$\frac{dx}{dz} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx \quad (2)$$

여기서 $x=[i^* \ V_c^* \ V_{cl}^*]^T$, $u=[1 \ 0 \ 0]^T$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\pi}{\mu} & -\frac{\pi}{\mu} \\ \frac{4\pi}{\mu} \frac{1}{n+1} & -\frac{4\pi}{\mu\lambda} \frac{1}{n+1} & 0 \\ \frac{4\pi}{\mu} \frac{n}{n+1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \frac{\pi}{\mu}$$

$$C=[0 \ 1 \ 0]$$

- <Mode 1: S1,S2:On>
 A1=A B1=B
 <Mode 2: D1,D2:On>
 A2=A, B2=B
 <Mode 3: S4,D2:On>
 A3=A B3=0
 <Mode 4: S3,S4:On>
 A4=A B4=-B
 <Mode 5: D3,D4:On>
 A5=A B5=-B
 <Mode 6: S1,S3:On>
 A6=A B6=0 (3)

표 1 동작모드

Switch Type	S1	S2	S3	S4	D1	D2	D3	D4	Mode
$\varphi=0^\circ$	on	on							1
					or	or			2
			on	on					4
							or	or	5
$\varphi>0^\circ$	on						on		6
					or	or			2
	or	on							1
				or	or				3
						or	or	5	
			on	on					4

회로의 상태방정식으로 부터 특성평가를 위해 수치해석방법(Runge-Kutta)을 도입하여 그림 3과 같은 신호 흐름선에 따라 계산을 수행하였다.

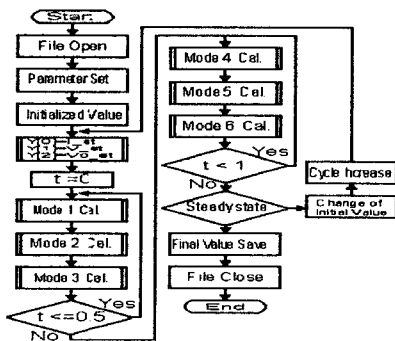


그림 3 회로해석의 순서도

2.3 회로의 특성과 고찰

상태방정식에 회로의 정규화 파라미터를 도입하여 특성평가를 수행하였다. 그림 4는 $n(C/C1)$ 의 파라미터를 위상쉬프트의 변화에 대한 출력 전력 특성을 나타낸다. 그림에서 $n=25$ 일 때 최소가 되며 $n=5$ 일 때 최대가 된다. 분할비가 5이상이면 출력이 도리어 감소됨을 알 수 있어 회로를 설계할 시에 중요한 자료로 주어진다. 그림 5는 출력전압 이득특성을 나타낸다. $n=0$ 에서 동작할 경우는 전압 이득의 제어 범위가 150° 까지 되고 $n=5$ 일 때 이득은 최대가 된다. $n=5$ 를 경계로 전압 이득은 거의 동일하게 나타나므로 n 의 범위는 $0\sim5$ 의

범위가 적합하다고 사료된다.

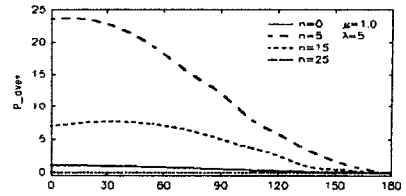


그림 4 출력 전력 특성

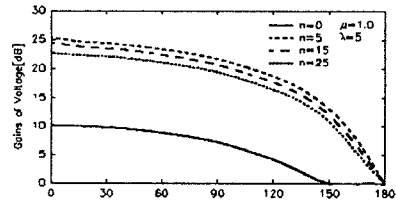


그림 5 전압 이득 특성

그림 6은 n 파라미터로 하였을 경우의 Q특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 $n=0$ 일 때는 최소가 되고 n 을 증가시킬수록 출력이 크게 발생됨을 볼 수 있다. 그러나, $n=20$ 이상일 경우 $\varphi=90^\circ$ 를 경계로 하여 φ 를 증가시킬 경우 급격히 출력이 감소하는 특성을 나타내고 있다.

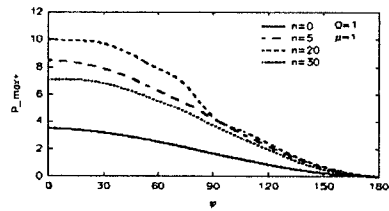


그림 6 Q특성

고조파 함유율은 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$H_n = \frac{v_{cn}^{rms}}{v_{cl}^{rms}} \times 100[\%]$$

단, v_{cl}^{rms} : v_c^* 의 기본파 실효치
 v_{cn}^{rms} : v_c^* 의 제 n 고조파 실효치

그림 7은 출력전압의 고조파 성분 함유율 H_n 의 스펙트럼을 나타낸다. 본 회로의 스위칭 주기의 듀티 비가 50%가 되기 때문에 출력전압은 대칭 정현파로 된다. 따라서 우수 고조파 성분은 나타나지 않고 기수 고조파 성분은 나타나지만 그 값은 대단히 적으므로 정현파로 동작됨을 입증하고 있다.

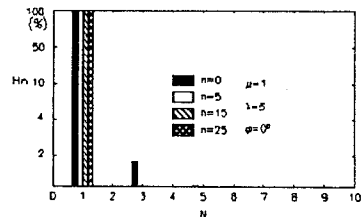


그림 7 출력전압의 고조파 함유율

2.4 설계 및 실험결과

회로의 해석을 통하여 얻은 특성 평가의 결과를 기초로 하여 회로 설계기법의 일 예와 설계수치 예를 나타낸다.

Step 1: λ, μ 결정

Step 2: P_{max}^* 결정

Step 3: 임피던스 기준량 산출

$$Z_s = E^2 \frac{P(z)}{P} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L(n+1)}{C}}$$

Step 4: 회로의 고유 주파수 f_r (kHz) 산출

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n+1}{LC}}$$

Step 5: L, C 결정

Step 6: 스위치 전류와 커패시터 전압 산출

(설계 수치 예)

$E=100[V], P=1[kW], f_{sw}=100[kHz]$

step 1: $\lambda=5, \mu=1, n=1$

step 2: $P_{max}^*=4.2$

Step 3: $Z_s = \frac{100^2 \times 4.2}{1 \times 10^3} = 42$

Step 4: $f_r=100[kHz]$

Step 5: $L=134.56[\mu H],$

$C=18.92[nF], C1=18.92[nF]$

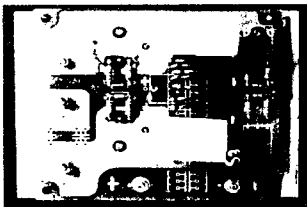
Step 6: $i_{sw}=15.26[A], v_{max}=631[V]$

본 회로에 사용한 회로 정수는 표 2와 같다.

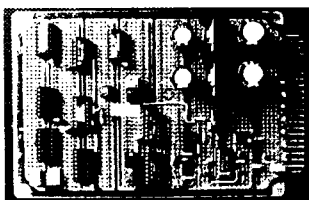
표 2 회로 정수

Circuit parameter	Values
스위칭소자(Power-MOSFET)	IRF360
입력전원	50[V]
인덕터(L)	1.05[uH]
커패시터(C)	4.7[uF]
커패시터(C1)	2.2[uF]
부하저항(R)	0.03[Ω]
주파수(f)	83[kHz]

그림 8은 실험을 위해 직접 제작한 인버터부와 PLL 제어 회로부를 나타낸다.



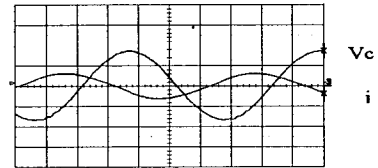
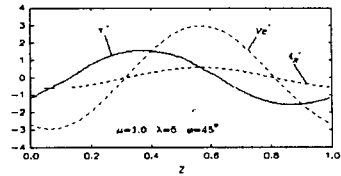
인버터회로



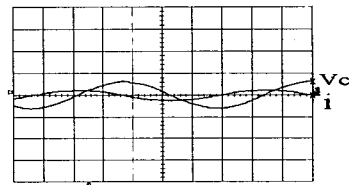
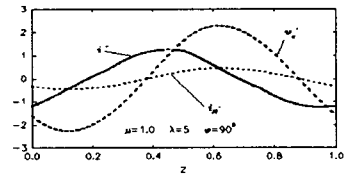
PLL 제어회로

그림 8 인버터부와 PLL제어회로

그림 9는 제안회로의 이론과 실험 결과 파형을 나타낸다. 이론 파형과 실험 파형이 거의 일치함을 볼 수 있다.(전압, 전류 Probe 비: 10:1)



(a) $\phi = 45^\circ$



(b) $\phi = 90^\circ$

그림 9 이론과 실험 파형

3. 결 론

본 논문에서는 직렬공진 FB 커패시터 분할형 고주파 인버터를 제안하고 이 인버터의 출력제어 방법으로 구동 신호 위상 쉬프트 방법에 대해 논하였다. 또한, 회로의 동작 원리를 서술하였으며 분할비에 따라 특성 평가를 하였다. 그리고 설계 방법 및 실제 시스템을 구성하여 이론 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 제안한 방법의 타당성을 입증하였다. 회로의 특성 평가를 통하여 분할비 $n=5$ 일 때 출력 전력특성이 최대가 되었으며 이득 특성은 $n=5$ 부근에서 최대가 됨을 알 수 있다. 고주파 함유율은 우수 고조파 성분은 나타나지 않고 기수분만 나타나나 그 크기는 대단히 적으므로 정현파로 동작됨을 볼 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1]M.Yamamoto,M.Nakaoka:"Latest Electromagnetic Induction-based Fluid-Heating Equipment using High Frequency PWM load Resonant Inverter".PEDS97 Vol.1.p153~162.
- [2]J.M.Espi,E.J.Dede:"Features and Design of the Voltage-Fed L-LC Resonant Inverter for Induction Heating".PESC99.Vol.2.p1126~1131.
- [3]F.C.Lee:"Constant-Frequency Phase-Controlled Resonant Power Processor".IASAM,1986.p617~622